

정수압이 탄소섬유/에폭시 복합재의 탄성일인자에 미치는 영향

이지훈, 김만태, 신명근, 한운용(경희대 대학원 기계공학과)
이경엽*(경희대 테크노공학대학)

Effect of Hydrostatic Pressure on the Elastic Work Factor of Graphitic/Epoxy Composites

J.H. Lee, M.T. Kim, M.K. Shin, W.Y. Han (Mech. Eng. Dept., KHU),
K.Y. Rhee*(College of Advanced Technology, KHU)

ABSTRACT

Work factor approach is conveniently used in metal fracture mechanics to determine fracture toughness from a single fracture test. In this work, we investigated the applicability of the work factor approach in order to determine fracture toughness of thick graphite/epoxy composites in the hydrostatic pressure environment from a single fracture test. The effect of hydrostatic pressure on the elastic work factor was studied. The stacking sequence used was multi-directional, $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{111}$. The hydrostatic pressures applied were 0.1 MPa, 100 MPa, 200 MPa, and 300 MPa. The results showed that the elastic work factor was not affected by the hydrostatic pressure. The elastic work factor decreased in a linear fashion with crack length.

Key Words : Hydrostatic pressure(정수압), Elastic work factor(탄성일인자), Fracture toughness(파괴인성)

1. 서론

본 논문에서는 잠수함 및 해저탐사선과 같은 해저구조물의 일부를 탄소섬유/에폭시 복합재료로 제작하기 위해 정수압 환경하에서의 탄소섬유/에폭시의 재료특성 변화에 대한 실험을 시행하였다. 초기 압력 환경에서 탄소섬유/에폭시 복합재의 물성특성 변화는 Parry와 Wronski에 의해 연구되었다. 이들은 정수압이 압축된 탄소섬유/에폭시 적층복합체에 대해 인장 및 압축특성에 미치는 영향을 연구하였으며 Rhee와 Paic는 탄소섬유/에폭시 적층복합체의 물성특성에 미치는 영향 및 압력이 비틀림 특성에 미치는 영향에 대한 연구를 하였다.^{1,2)} 또한 압력 환경에서 압축 변형률 속도가 탄소섬유/에폭시 복합재의 압축특성에 미치는 영향에 대한 연구가 Paic와

Carlsson에 의해 행하여졌다.³⁾ 또한 정수압력하에서 단일방향으로의 인장특성은 Zinoviev et al에 의해 연구되어졌다.^{4,5)}

그러나 위의 연구는 압력이 유리섬유 또는 탄소섬유/에폭시 복합체에 있어 압축특성, 인장특성, 전단특성에 미치는 영향에 제한된 것으로서 압력 환경하에서의 층간분리 거동에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 층간분리는 섬유강화 적층복합재에서 빈번하게 발생하는 파괴형태의 하나라는 사실이 잘 알려져 있다.

최근에는 Rhee에 의해 0° 단일방향으로 적층된 탄소섬유/에폭시 복합체에 있어 정수압이 층간분리 거동에 미치는 영향에 대한 연구가 이루어졌다. 결과로서 층간분리에 의한 파괴는 압력에 의해 상당한 영향을 받는다는 사실이 발표되었다. 특히 층간

분리인성의 경우 압력이 0.1 MPa에서 200 MPa로 증가할 때 34% 이상 증가한다는 것이 발표되었다.

한편 섬유강화 적층복합재의 중간분리에 의한 파괴 거동은 섬유방향, 적층순서, 하중방향에 의해 영향을 받는다.⁹⁾⁷⁾ 따라서 압력 환경에서 탄소섬유/에폭시 적층복합재의 중간분리 거동을 폭넓게 이해하기 위해서는 다양한 적층성을 갖는 경우에 대한 압력 환경에서 중간분리에 의한 파괴실험이 필요하다.

본 연구에서는 다방향으로 적층된 두꺼운 두께를 갖는 탄소섬유/에폭시 적층복합재에 있어 압력 변화에 따른 압축파괴인성 변화에 대해 연구하였다. 즉 준등방성, $[0^{\circ}/\pm 45^{\circ}/90^{\circ}]_{16}$ 로 적층된 탄소섬유/에폭시 복합재에 대해 압력을 0.1 MPa, 100 MPa, 200 MPa, 300 MPa로 변화시켜 압축 파괴실험을 수행하였으며 이로부터 압력 변화에 따른 파괴특성 변화에 대해 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 압축 파괴시험편 제작

본 연구에서는 시험편의 재료로서 필라멘트 부직포 탄소섬유/에폭시 프리프레그(CU125NS)를 사용하였다. 프리프레그는 탄소섬유 함유율이 64%이며 두께는 약 0.125 mm이다. 또한 시험제작시 88층의 프리프레그를 45 cm×25 cm 크기의 금형 내에서 $[0^{\circ}/\pm 45^{\circ}/90^{\circ}]_{16}$ 에 따른 적층순서로 적층한 후 autoclave 내에서 열 및 압력을 가함으로써 성형하였다.

성형된 판의 두께는 약 12.5 mm이다. 압력 증가에 따른 파괴인성 변화를 컴플라이언스 방법을 적용하여 결정하기 위해 네 단계의 초기 중간분리 길이를 갖는 시험편을 제작하였으며 초기 중간분리는 44층과 45층 사이에 길이가 35 mm인 알루미늄 호일을 삽입하여 형성하였다. 시험편은 압축하중 작용시 양단에서의 파괴(end-crushing)가 발생하지 않도록 양 끝은 직경이 10 mm, 가운데 부분은 폭 및 두께가 각각 7 mm인 도그본(dog-bone) 형태로 가공하였다. 시험편의 모양, 크기 및 4단계의 초기 중간분리 길이는 Fig. 1에 나타나 있다.

2.2 정수압 하에서의 압축 파괴시험

압축실험은 고압 인장-압축기기(high pressure tension-compression apparatus)를 이용하여 대기압 700 MPa의 정수압을 가한 상태에서 시행하였다. 압축실험은 1.2 mm/min의 일정 변형률 속도 하에서 시행되었으며 실험에 따른 하중 및 하중점의 변형 데이터는 LABTECH NOTEBOOK(version 6.3)프로그램을 이

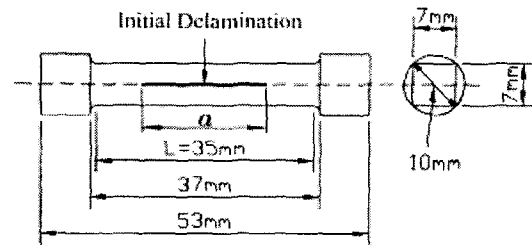


Fig. 1 Configuration of test specimen.

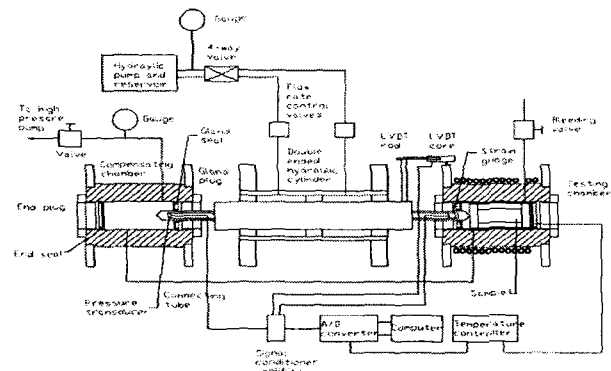


Fig. 2 Schematic diagram of high pressure tension-compression testing set-up.

용 취합 및 해석하였다. Fig. 2는 고압 인장-압축 기기를 나타내는 도형이다. 실험 결과의 유사성을 판단하기 위하여 최소한 세 번의 실험을 각각의 같은 압력 조건하에서 반복하여 시행하였다. 시험표본은 시험장치 내의 실리콘 오일(Dow Corning, 200)이 시험편에 흡수되는 것을 최대한 억제하기 위해 실리콘을 이용해 방수막 처리를 하였다.

3. 탄성일인자

선형 파괴거동을 나타내는 재료에 있어 에너지 방출률은 탄성일인자, U_{el} 을 적용하였을 때 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$J = G = \frac{\eta_{el}}{18b} A_{el} \quad (1)$$

위의 식에서 "G"는 에너지 방출률을 "B"는 리가면트를, "B"는 두께를 나타낸다. 또한 A_{el} 은 하중(P)-변형(ν) 곡선하의 면적이며 $P\nu/2$ 와 같다. 한편 에너지 방출률은 컴플라이언스 방법을 이용하면 다음과 같이 구해진다.

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{dc} \quad (2)$$

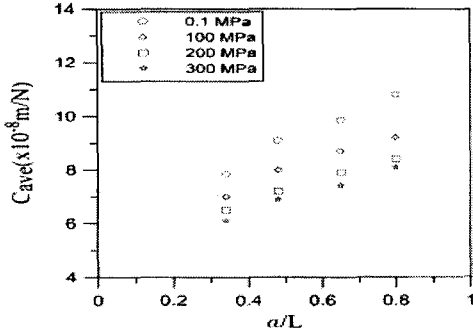


Fig. 3 Effect of hydrostatic pressure on the average compliance, C_{ave}

윗 식에서 "C"는 컴플라이언스이며 "a"는 균열길이를 나타낸다. 식 (1)과 (2)로부터 η_{cl} 은 다음과 같이 결정된다.

$$\eta_{cl} = \frac{b}{C} \frac{dC}{da} \quad (3)$$

대기압 환경에서 CLS 시편의 경우 η_{cl} 은 적층각에 대해 영향을 받지 않는다는 것이 발표된 바 있다. 만약 본 연구에 사용된 시편의 경우 η_{cl} 이 정수압 및 적층각에 의해 영향을 받지 않으며 단지 층간분리 길이만의 함수라 하면 정수압 환경에서도 파괴인성 값은 식 (1)을 이용해 한 번의 파괴시험으로부터 결정할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

탄성일인자를 결정하기 위해서는 식 (3)에 나타나 있듯이 층간분리 증가에 따른 컴플라이언스 변화가 결정되어야 한다. 정수압이 탄성일인자에 미치는 영향을 결정하기 위해 정수압 및 층간분리 증가에 따른 컴플라이언스 변화를 결정하였다. 컴플라이언스는 변위를 하중으로 나눈 값으로서 각 정수압에 대한 하중-변위 선도의 기울기를 측정 이에 대한 역수를 취함으로써 결정하였다. Fig. 3은 정수압 및 층간분리 증가에 따른 최소 및 최대 컴플라이언스를 평균한 평균 컴플라이언스 변화를 나타내고 있다. 그림에 나타나 있듯이 각 정수압에 있어 층간분리가 증가함에 따라 평균 컴플라이언스는 선형으로 증가함을 알 수 있다. 따라서 최소 자승법을 이용해 각 정수압에 대한 평균 컴플라이언스의 층간분리에 대한 증가를 1차식으로 나타내면 다음과 같다.

$$C_{ave} = 6.01 \frac{a}{L} + 5.73 (10^{-8} m/N); 0.1 MPa \quad (4)$$

$$C_{ave} = 5.23 \frac{a}{L} + 5.33 (10^{-8} m/N); 100 MPa \quad (5)$$

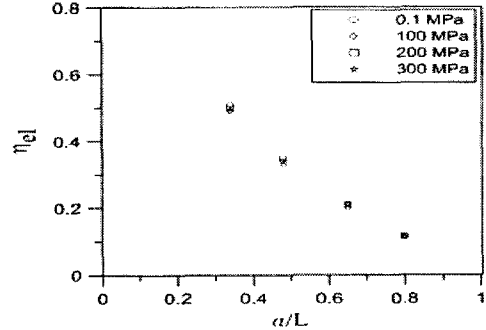


Fig. 4 Variation of η_{cl} as a function of crack length at each hydrostatic pressure.

$$C_{ave} = 4.87 \frac{a}{L} + 4.97 (10^{-8} m/N); 200 MPa \quad (6)$$

$$C_{ave} = 4.60 \frac{a}{L} + 4.75 (10^{-8} m/N); 300 MPa \quad (7)$$

식 (4)-(7)에서 C_{ave} 는 평균 컴플라이언스를, "a"는 층간분리 길이를, "L"은 게이지 길이를 나타낸다. 각 정수압 및 층간분리 길이에 따른 탄성일인자는 식 (4)-(7)로부터 컴플라이언스 및 그에 따른 도함수를 구하고 이를 식(3)에 대입하여 결정하였다. Fig. 4는 네 경우 정수압에 있어 층간분리 길이 증가에 따른 탄성일인자 변화를 나타낸다. Fig. 4에 나타나 있듯이 탄성일인자는 층간분리 길이가 일정할 경우 정수압 증가에 의해 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 또한 Fig. 4는 층간분리 길이가 증가함에 따라 탄성일인자는 선형적으로 감소함을 나타내고 있다. 따라서 탄성일인자를 층간분리 길이에 대해 1차식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\eta_{cl} = 0.83 - 0.91 \frac{a}{L} \quad (8)$$

5. 결론

본 논문에서는 정수압하에서 압축하중을 받는 탄소섬유/에폭시 적층 복합체에서 정수압이 탄성일인자에 미치는 영향에 대해 검토하였다. 즉 $10^7 \pm 45^\circ/90^\circ$ 로 적층된 탄소섬유/에폭시에 있어 네 단계 정수압에 대해 탄성일인자를 층간분리 길이의 함수로 결정하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다. 첫째, 탄성일인자는 정수압에 의해 영향을 받지 않는다. 둘째, 탄성일인자는 층간분리가 증가함에 따라 선형적으로 감소한다.

후기

본 연구는 한국과학기술원 목직기초연구(과제번호 R05-2003-000-12306-0)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Rhee K. Y., Pae K. D., "Effects of hydrostatic pressure on the compressive properties of laminated 00 unidirectional behavior of graphite fiber/epoxy thick composites," *J. of composite Materials*, Vol. 29, pp. 1295-307, 1995.
2. Pae K. D., Rhee K. Y., "Effects of hydrostatic pressure on the compressive behavior of laminated 450 and 900 unidirectional behavior of graphite fiber/epoxy matrix thick composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 53, pp. 281-7, 1995.
3. Pae K. D., Carlson K. S., "The combined effects of hydrostatic pressure and strain-rate on the compressive properties of a laminated multi-directional graphite/epoxy thick composites," *J. of composite Materials*, Vol. 32, pp. 49-67, 1998.
4. Zinoviev P. A., Tsvetkov S. V., Kulish G. G., Van den Berg R. W., Van Schepdael L., "The behavior of high-strength unidirectional composites under tension with superposed hydrostatic pressure," *Composites Science and Technology*, Vol. 61, pp. 1151-61, 2001.
5. Zinoviev P. A., Tsvetkov S. V., "Mechanical properties of unidirectional organic-fiber-reinforced plastics under hydrostatics pressure," *Composites Science and Technology*, Vol. 58, pp. 31-9, 1998.
6. Rhee K. Y., "Hydrostatic pressure effect on the fracture toughness of unidirectional (0-deg) graphite/epoxy laminated composites," *J. of Composite Materials*, Vol. 34, pp. 599-613, 2000.
7. Rhee K. Y., Oh W. S., Jang S. H., Park S. J., "Delamination characteristics of multi-directional carbon fiber/epoxy composites under high pressure environment," *Polymer Composites*, Vol. 22, pp. 793-802, 2001.
8. Rhee K. Y., Ernst H. A., "A study on the application of work factor approach to composites laminates," *J. of Composite Materials*, Vol. 27, pp. 962-72, 1993.
9. Carlson K. S., "Combined effect of strain rate and hydrostatic pressure on compressive properties of thick multi-directional graphite/epoxy composites," MS thesis, Rutgers University, 1995.
10. Weaver, C. W., Williams J. G., "Deformation of a carbon-epoxy composite under hydrostatic pressure," *J. of Materials Science*, Vol. 10, pp. 1323-33, 1975.
11. Parry T. V. and Wronski A. S., "The effect of hydrostatic pressure on the tensile under properties of pultruded CFRP," *J. of Materials Science*, Vol. 20, pp. 3656-62, 1982.
12. Wronski A. S., Parry T. V., "Compressive failure and kinking in the uniaxially aligned glass-resin composite under superimposed hydrostatic pressure," *J. of Materials Science*, Vol. 20, pp. 3656-62, 1982.
13. Shin E. S., Pae K. D., "Effects of hydrostatic pressure on the torsional behavior of graphite/epoxy composites," *J. of composite Materials*, Vol. 26, pp. 462-85, 1992.
14. Shin E. S., Pae K. D., "Effects of hydrostatic pressure on in-plane shear properties of graphite/epoxy composites," *J. of composite Materials*, Vol. 26 pp. 828-68, 1992.
15. Merkle J. G., Corten H. T., "A J integral analysis for the compact specimen considering axial force as well as bending effects," *J. Press Vess Technology*, Vol. 96, pp. 286-92, 1974.
16. Griffith A. A., "The phenomena of rupture and flaw in solids transaction," *Royal Society of London*, pp. A-221, 1920.